两种戈壁地表风沙流特征的野外观测

刘旭阳[1,2]*，宁文晓[1,2]，王振亭[1]

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化研究室，甘肃 兰州 730000；

2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：分析植被覆盖和人工扰动下戈壁地表的风沙流结构和摩阻风速与输沙率之间的关系，对保护戈壁区的生态环境具有重要意义。本文分别对植被覆盖下的戈壁地表和人工清除植被后的戈壁地表进行研究。结果显示：在不同的地表条件下，风沙流结构的变化趋势基本相同，大致可以分为 3 类：波动减少、先增加后减少和单调减少。受扰地表的输沙率密度大于原始地表。将摩阻风速以 0.50 $m \cdot s^{-1}$为界分为高、低风速。在植被覆盖的地表中，高、低风速区的输沙率与摩阻风速之间没有明显的线性相关性；而在人工清除植被后的地表，高风速区内，输沙率与摩阻风速之间满足传统的低阶多项式的关系，低风速区内两者之间则没有线性关系。

关键词：戈壁地表；风沙流结构；输沙率；摩阻风速

戈壁，也称“砾漠”，是指分布于干旱或极端干旱区，地表由砾石覆盖的一类荒漠景观。其自然特征包括土壤发育微弱、植被覆盖稀疏、表层具有极不稳定的孔状结皮等[1]。在我国，戈壁集中分布在阿拉善高原、河西走廊、准噶尔盆地、塔里木盆地等地区，其总面积约5.695×10^5 km^2[2]。与流沙地表相比，对戈壁风沙研究较为薄弱。戈壁地表风沙流结构的最显著特征在于“象鼻效应”[3]。这是由于戈壁地表沙粒起跃角的平均值普遍大于流沙地表，而风速、起跃角大小、沙粒大小等都是影响风沙流结构的重要因素[4]。前人主要通过风洞实验[2],[5]和野外观测[6]错误!未找到引用源。方法对戈壁地表的风沙流结构、风速廓线以及输沙率和风速之间的关系等风沙物理学核心问题进行了有益探索。张克存等[7]-[9]的风洞实验表明，风沙活动主要集中在距地表 20 cm 范围内，风沙流结构呈现“象鼻效应”的特征，最大含沙量的高度层随风速的增加而上移。柳本立等[6]对莫高窟顶的自然戈壁床面的野外观测显示，在某时段内风沙流结构显示出与流沙地表相同的变化趋势，而在另一时段则表现出“象鼻效应”的特征。黄翠华等[10]错误!未找到引用源。以敦煌莫高窟窟顶的风沙运动为例，对沙质地表和砾质戈壁地表的风沙运动进行了比较，发现两者之间差异显著，即沙质地表输沙量随高度呈指数规律递减，而戈壁地表在某一高度达到最大输沙量，且这个高度随着风速的增大而增加。王志强等[10]对新疆罗布泊戈壁地区的风沙运动的野外观测表明，风沙活动层主要集中在距地表 60 cm 高度内，且不同粒径沙粒输沙强度的垂向分布不同，输沙率与风速之间服从指数函数关系。由此可见，已有的戈壁地表风沙运动研究结果之间存在较大差异。理想情况下的风洞模拟实验一般能够得到风沙流结构的“象鼻效应”[2]-[3],[8]-[9]，且最大输沙量出现的高度随着风速的增加而升高；而野外观测在某风速下能得到这种规律[3],错误!未找到引用源。,[10]，在其他条件下则呈现出与流沙地表相同的变化趋势错误!未找到引用源。,[12]。自然界中复杂多变的风况，粒径范围较大的地表物质成分，不同盖度的砾石和植被等均是影响戈壁风沙运动的重要因素。这可能是上述结果之间难以进行定量对比的原因。为了深入认识戈壁风沙运动规律，很有必要加强针对各种典型地表的野外观测工作。

在自然环境中，戈壁不同于流沙地表，戈壁是长时间风蚀的产物[13]。最近的野外观测、风洞实验与风况分析表明，广大戈壁地区是巴丹吉林沙漠与黄土高原的重要物源[14]。因此，风蚀一直是戈壁研究的重要组成部分。目前对戈壁地表的研究还体现在风蚀上，戈壁区域内，不同的地表条件所产生的风蚀量不同。孟小楠等[15]根据车辆碾压的次数，对地表的起尘浓度

收稿日期：2019-10-04；**修订日期**：2019-11-13

基金项目：国家自然科学基金项目(41630747，41971011)

作者简介：刘旭阳（1996-），女，硕士，研究方向为沙漠化与沙漠环境. E-mail:liuxuyang18@mails.ucas.ac.cn

进行了分析，车辆碾压次数越多，起尘浓度越大，这表明人类活动对戈壁地表的影响很大，应当对戈壁地表采取保护措施，以减少风蚀量。殷代英等[16]通过风洞实验，将戈壁地表进行了不同程度的破坏，分析了不同扰动方式对砂砾质地表风蚀量的影响，结果表明，破坏程度越大，风蚀量越大。砾石在一定程度上可降低风速[17]，从而减少风蚀量。与裸露地表相比，有砾石覆盖的地表能明显减少风蚀，且砾石大小对风蚀量也有影响[18]。而王训明等[19]在中蒙戈壁区的研究结果与传统认识并不一致，在低砾石覆盖戈壁区，砾石覆盖度增加会增强气流对地表的风蚀能力。此外，植被也有减少风蚀的作用，随着植被盖度的增加，输沙率随高度显著下降[20]。显然，对戈壁风沙流基本运动规律的研究必将有助于确定风蚀量以及砾石与植被在风蚀过程中的地位与作用。

本文通过对植被覆盖与人工去除植被后戈壁地表风沙活动的观测，对比分析其风沙流结构，并探讨输沙率与摩阻风速之间的关系，以期为戈壁地区防治土壤侵蚀提供基础数据支持，丰富戈壁地区风沙研究内容，为保护戈壁生态环境提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于河西走廊的最西端，地处甘肃、青海、新疆 3 省交汇处，以当金山口为界，西邻阿尔金山，东接祁连山。观测点隶属于甘肃省酒泉市阿克塞县，地处敦煌市西南方向 50 km 处（图 1）。该区属温带大陆性干旱气候，气候冷、热、干、湿差异明显，年平均降水量 40 mm 左右，主要集中于夏季且年际变化较大，年蒸发量在 2000 mm 以上，蒸发量远大于降水量，大风日数较多，沙尘暴频发，研究区内盛行西北风[21]。本研究于 2017 年分别对两种地表进行观测，一种为有植被覆盖的自然戈壁地表（图 1a），地表物质主要由粗砂、细砂和少部分的粉砂组成（表 1），表面零星分布有低矮植被；另一种是在相同地区人工去除植被后的地表（图 1b），由于受到人工扰动，砾石含量减少，粗砂含量增加，细砂含量减小，粉砂和黏粒含量增加，地表同样以粗砂和细砂为主。在盛行风的上风向利用化学材料做好固沙措施，设置集沙仪和三维超声风速仪进行观测。

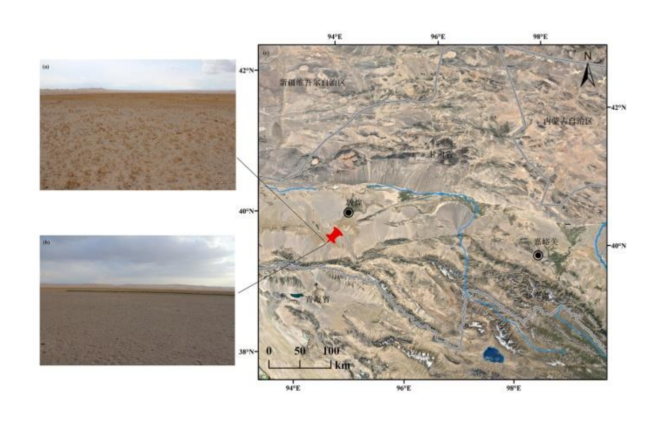


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area overview

表 1 两种戈壁地表的颗粒组成

Table 1 Particle size distributions of two typical Gobi surfaces

粒径		颗粒粒度质量百分比/%	
		植被覆盖的地表	无植被覆盖的地表
砾石	（>2 mm）	2.77	0.93
粗砂	(0.2~2 mm）	20.16	23.65

细砂	(0.02~0.2 mm）	71.31	59.44
粉砂	(0.002~0.02 mm)	5.27	13.67
黏粒	(<0.002 mm)	0.49	2.31

1.2 研究方法

2017 年 3–5 月，笔者完成了对戈壁观测场的选址、清理、仪器布设及系统的野外工作。为了探讨风沙流结构和输沙率随摩阻风速的变化规律，分别于 3 月 26 日至 4 月 16 日和 4 月 5 日至 5 月 2 日对两种戈壁地表进行风沙运动观测。第一个时间段于 26 日 18 时在人工清除植被后的戈壁地表上开始观测，观测时长 30 min，对应的摩阻风速为 0.25 $m \cdot s^{-1}$；第二个时间段是在同一地区有植被覆盖的地表进行的观测，从 4 月 5 日 17 时开始，观测时长为 37 min，对应的摩阻风速为 0.40 $m \cdot s^{-1}$。在每次观测过程中，风向基本稳定，其中，4 月 5 日至 4 月 16 日在两种地表同步观测，且观测时间和时长亦大致相同。截至 5 月 2 日，共观测了 89 次，由于受自然条件和人为影响，共有 36 组数据可用。其中，天然地表共观测 43 次，可用数据 17 组。清除植被后的地表共观测 46 次，可用数据 19 组。风沙流结构是指气流中所搬运的沙子在搬运层内随高度的分布。参考顺风向跃移通量密度的概念[22]，定义输沙率密度为某一高度处在单位时间内通过与风向垂直的单位面积沙量，其随高度分布即为风沙流结构。输沙率是气流在单位时间单位宽度内所搬运沙子的质量，代表一定风速及沙源条件下的地表输沙能力[5]。

野外所使用的新型平口式集沙仪，其底部的进沙口始终与地面垂直。集沙仪总高 0. 85 m，采集高度为 0.6 m，由固定座，前盖的盒体与集沙盒 3 部分组成[23]。一个集沙仪有 10 个进沙口，每个进沙口处有一个集沙盒，对应的高度分别为 0.02、0.12、0.22、0.32、0.38、0.44、0.49、0.53、0.57、0.60 m[24]。集沙盒由铁皮制成，长 0.03 m，宽 0.015 m，面积是 0.00045 m^2。假设某个高度处的集沙盒在某一时间段 T 内收集的沙子质量为m，则输沙率密度 q 为：

$$q = \frac{m}{ST} \tag{1}$$

式中 S 为集沙盒入口面积。最终计算得到的输沙率密度的单位为$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。忽略集沙仪观测范围以外的输沙量，假设相邻集沙盒之间的输沙率密度 q 为高度的线性函数，对其积分即为输沙率 Q，积分的上下限分别为集沙盒最小和最大高度。具体计算中，分段线性函数的系数由端点处的输沙率密度确定。用此方法对原始数据进行计算，获得两种不同地表条件下不同摩阻风速所对应的输沙率。为方便起见，输沙率单位为 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$。

摩阻风速是通过瞬时速度计算得到的。瞬时风速由 0.50 m 和 1 m 高度处的两个超声风速仪以 20 Hz 的频率记录。设第一个风速仪测得的风速分量为u_1, v_1, w_1，则瞬时水平速度为$U_1 = \sqrt{u_1^2 + v_1^2}$,竖直速度为$W_1 = w_1$。脉动速度可表示为：

$$U_1' = u_1 - \overline{U_1} \tag{2}$$

$$W_1' = w_1 - \overline{W_1} \tag{3}$$

式中，$\overline{U_1}$和$\overline{W_1}$为水平和竖直方向的平均速度。在湍流混合长度理论中，摩阻速度不随高度变化，可由脉动速度表示为：

$$u_* = \sqrt{|\overline{U_1' W_1'}|} \tag{4}$$

用相同的方法计算出第二个超声风速仪的摩阻速度，再将两个摩阻速度相加后求均值，得到某一观测时间段内的摩阻风速U_*。

2 结果与讨论

2.1 风沙流结构

2.1.1 植被覆盖地表上的风沙流结构

鉴于不同观测得到的输沙率密度差别较大，为了更直观地表示风沙流结构，首先对数据

进行了归一化处理，使得每次观测的无量纲输沙率密度值介于 0~1 之间。与原始数据相比，风沙流结构曲线的变化趋势未发生实质性改变。归一化后，各集沙盒高度依次变为 0.03、0.20、0.37、0.53、0.63、0.73、0.82、0.88、0.95、1。根据曲线变化趋势，可以将风沙流结构大致分为 3 类：波动减少、先增加后减少和单调减少，每一类选取 3 条典型的风沙流结构曲线进行分析。如图 2a 所示，在植被覆盖的地表上，当风速为 0.31 $m\cdot s^{-1}$、0.39 $m\cdot s^{-1}$和 0.43 $m\cdot s^{-1}$时，观测时长分别为 75 min、12 min 和 18 min，风沙流结构呈现出波动减少的趋势，最大值在近地表 0.02 m 处，之后随着高度的增加，输沙率密度整体减小，但不是单调递减。如风速为 0.43 $m\cdot s^{-1}$时，随着高度的增加，输沙率密度在 0.03~0.73 之间减少，在 0.73~0.82 之间增加，后又减少，表现出波动变化的趋势。整体来看，高度小于 0.20 时，在 0.31 $m\cdot s^{-1}$风速下的输沙率密度大于 0.39 $m\cdot s^{-1}$风速下的输沙率密度。高度在 0.20-0.53 时相反，这两个风速下的输沙率密度均小于风速 0.43 $m\cdot s^{-1}$下的输沙率密度。当高度大于 0.63 时，0.39 $m\cdot s^{-1}$风速下的输沙率密度大于其他两个风速下的输沙率密度，但总体上输沙率密度与风速呈正相关关系，即风速越大，输沙率密度也越大。

当风速为 0.52 $m\cdot s^{-1}$、0.56 $m\cdot s^{-1}$和 0.59 $m\cdot s^{-1}$时，对应的观测时长分别为 60 min、13 min、5 min，风沙流结构的变化为先增加后减少，最大值在 0.20 处，即 0.12 m 高度处，随后随着高度的增加波动减少。在高度 0.03 处，输沙率密度的大小为风速$0.59\ m\cdot s^{-1} > 0.52\ m\cdot s^{-1} > 0.56\ m\cdot s^{-1}$，在 0.20 处，3 个风速下的输沙率密度大致相同。随后在 0.37 处，输沙率密度在风速 0.56 $m\cdot s^{-1}$时最大，在 0.52 $m\cdot s^{-1}$时最小。高于 0.37 时，0.59 $m\cdot s^{-1}$风速下的输沙率较小。在这个风速下观测时间短，风速大，与阵风有同样的效应，砂粒还没有撞击地面激溅更多的颗粒进入更高的高度层，因此在较高的高度层内输沙率密度较小。

当风速为 0.38 $m\cdot s^{-1}$、0.55 $m\cdot s^{-1}$和 0.58 $m\cdot s^{-1}$时，对应的观测时间为 20 min、13 min、10 min，风沙流结构大致表现为单调减少。从图 2a 中可以看出，风速为 0.38 $m\cdot s^{-1}$时，输沙率密度小，输沙率密度的最大值在近地表。当高度增加时，输沙率密度随之减少，在 0.73 处有略微凸起，大致上仍符合单调减少的趋势。风速为 0.55 $m\cdot s^{-1}$时输沙率密度总体上要大于 0.58 $m\cdot s^{-1}$时的输沙率密度。摩阻风速受瞬时速度和平均速度的影响，瞬时速度和平均速度不仅受观测时长影响，更与观测时的野外条件密不可分。在吹蚀时间为 13 min 内，瞬时速度变大，吹起更多的砂粒脱离地表，从而使该时段内的输沙率密度变大。

2.1.2 无植被覆盖地表上的风沙流结构

在人工清除植被后的地表中，风沙流结构的变化与有植被覆盖时相同。同样将风沙流结构分为波动减少、先增加后减少和单调减少 3 种类型。如图 2b 所示，当风速为 0.31 $m\cdot s^{-1}$、0.40 $m\cdot s^{-1}$和 0.56 $m\cdot s^{-1}$时，观测时长为 75 min、37 min、4 min，风沙流结构的变化趋势为波动减少，即随着高度的增加，输沙率密度总体减少，但在个别高度上增加。如当风速为 0.40 $m\cdot s^{-1}$时，输沙率密度在 0.03~0.20 内减少，在 0.20~0.53 内增加，在 0.53~0.73 内减少，在 0.73~0.88 内增加之后又减少。由此可见，风沙流结构经历了减少、增加、减少、增加又减少的过程。在 0.40 $m\cdot s^{-1}$风速下的输沙率密度只在 0.37 高度大于 0.31 $m\cdot s^{-1}$风速的输沙率密度，在其他高度均比较小，0.56 $m\cdot s^{-1}$风速下的输沙率密度则较大。

在先增加后减少这个类型中，风速 0.39 $m\cdot s^{-1}$、0.43 $m\cdot s^{-1}$和 0.59 $m\cdot s^{-1}$分别对应的观测时长为 12 min、18 min 和 5 min，风沙流结构表现为先增加后减少的趋势。输沙率密度在近地表处 0.43 $m\cdot s^{-1}$风速下最大，0.59 $m\cdot s^{-1}$风速最小，在 0.20 处出现峰值，符合戈壁风沙流结构“象鼻效应”的特征。高于 0.20 高度时输沙率密度的大小为 0.59 $m\cdot s^{-1}$风速下最大，在 0.43 $m\cdot s^{-1}$风速下最小。

当风速为 0.32 $m\cdot s^{-1}$、0.35 $m\cdot s^{-1}$和 0.49 $m\cdot s^{-1}$时，对应的观测时间为 32 min、36 min 和 34 min，风沙流结构呈现出单调减少的趋势。输沙率密度在近地表附近最大，之后随着高度的增加，输沙率密度随之减少。总的来看，在此类型下的输沙率密度在风速0.32$m\cdot s^{-1}$

时最大，其次是0.49 m · s⁻¹，0.35m · s⁻¹最小。以上所描述的风沙流结构与风速之间无明显关系。在波动减少和先增加后减少这两个类型中，输沙率密度在较大风速时表现出更大的值。在单调减少的类型中，最小风速的输沙率密度反而更大。输沙率密度不仅受风速的影响，还受沙源供给的影响，戈壁风沙流结构特征值远大于 1，说明不论风速多大，风沙流都处于未饱和的搬运状态[3]。

综上可知，在两种地表条件下的风沙流结构较为复杂，整体上变化趋势相同，与传统的戈壁风沙流符合“象鼻效应”的特征不一致。而植被覆盖的地表上的风沙流结构在较高的高度变化较大，可能是由于砂粒被吹起后反弹的高度更高所致。砾石及植被覆盖能显著增加地表粗糙度，增强地表抗侵蚀能力，减少土壤风蚀，在一定程度上能够抑制沙尘事件的发生[25]。野外条件错综复杂，以上只是描述了研究区戈壁地表风沙流结构的基本特征，对于其具体的形成机制还有待进一步研究。

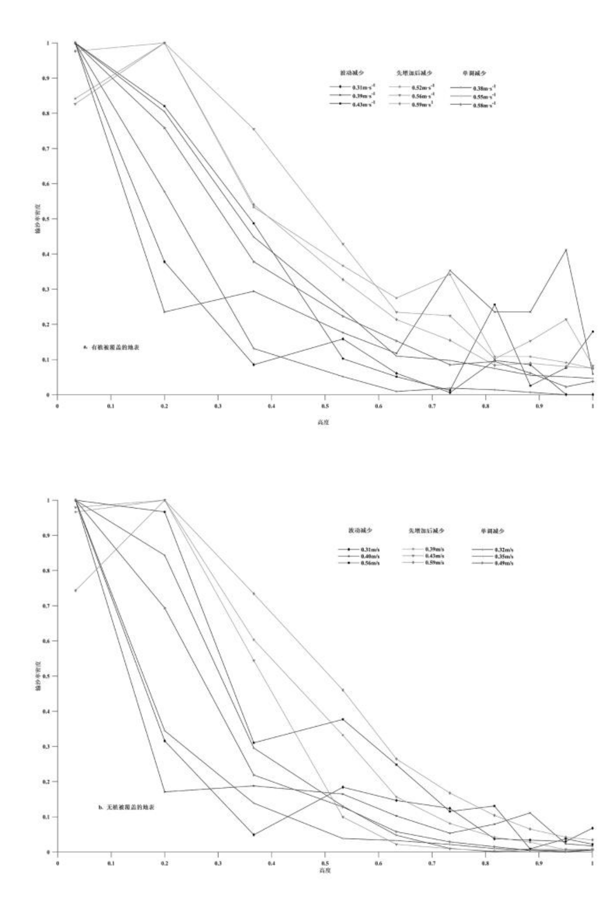


图 2 不同地表的风沙流结构

Fig.2 Aeolian sand structure on different surfaces

2.2 摩阻风速与输沙率的关系

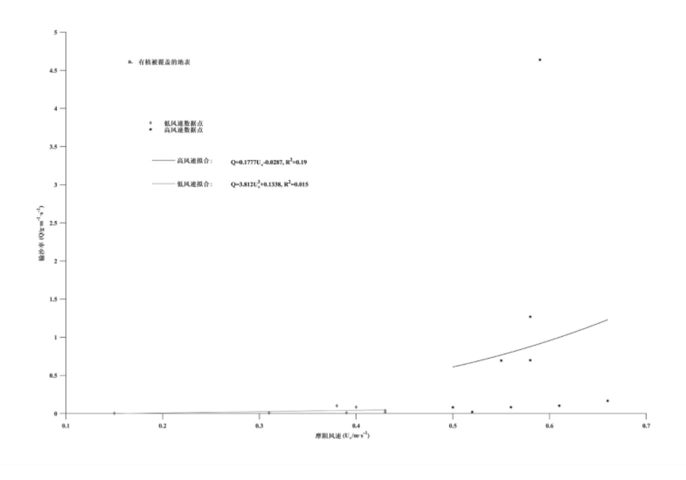
Bagnold[26]提出输沙率与超过砂粒起动风速的三次方呈正比，随后众多国内外学者都对Bagnold提出的理论公式进行了修正，但依然遵循输沙率与摩阻风速的三次方呈正比的规律。而屈建军等[2]和王志强等[10]在戈壁地表上给出的经验关系不符合三次方规律。Tan等[27]在莫高窟顶进行的野外观测，所得到的输沙率与摩阻风速可以用Owen（1964）的跃移公式来描述。图3给出了本研究的野外观测结果。在两种地表条件下，输沙率随摩阻风速的增大总体上呈现出增加的趋势。当摩阻风速增大时，气流的搬运能力较强，地表所受侵蚀也较大。在植被覆盖的戈壁地表中，颗粒在摩阻风速较小时很少产生移动，摩阻风速越大，气流的输沙能力越强，所搬运的砂粒越多。地表受扰后，输沙率随着摩阻风速的增大迅速增加，增加速

度大于原始地表。从图3中可以看出，摩阻风速越大，两种地表输沙率的差异越大。且在原始地表有低矮植被覆盖。从空气动力学的角度看，植被通过增大空气动力学粗糙度改变风力强度，从而对风蚀有抑制作用[28]，因而原始地表的输沙率普遍小于受扰地表的输沙率。

受复杂的野外条件及相对粗糙的输沙测量技术所限，实测数据具有很大的分散性。故而以摩阻风速0.50 $m \cdot s^{-1}$为界，划分出低与高风速区，分别将不同地表条件下的摩阻风速与输沙率进行拟合分析。低风速区用线性函数拟合，高风速区用传统的低阶多项式拟合。如图3a所示，在有植被覆盖的原始地表，总体拟合程度较差，相关性系数较低，输沙率随着风速的增加整体上呈现出增加的趋势，在风速为0.59 $m \cdot s^{-1}$时达到最大值，为4.637$g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$，风速为0.15 $m \cdot s^{-1}$时出现最小值0.003$g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$，在该地表条件下，输沙率的平均值为0.47 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$。图3b中，在受到人工扰动的地表上，高风速区的摩阻风速与输沙率符合传统的低阶多项式关系，即：

$$Q = a \cdot U_*^3 + b \tag{5}$$

式中，Q 为输沙率；U_*为摩阻风速；a、b 分别为拟合参数值（图 3）。摩阻风速与输沙率之间的相关系数较高，符合传统低阶多项式的规律。而在低风速区，用线性函数进行拟合，相关程度低，总体上表现出增加的趋势。最大值出现在风速为 0.45 $m \cdot s^{-1}$时，输沙率为 3.993 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$，最小值出现在风速为 0.31 $m \cdot s^{-1}$时，输沙率为 0.016 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$，输沙率的平均值为 0.75 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$。间歇性是风沙运动的固有属性[29]。当沙源供应不足时，这种现象尤为显著。摩阻速度和通过集沙仪测量到的输沙率是对风沙运动在一定时间内的平均描述。这可能是低风速区内二者之间缺乏良好对应关系的主要原因。当风速较大时，气流携带的能量更多地被跃移颗粒传递给地表，空中与地表之间的物质交换更容易趋于平衡，从而输沙规律大致符合具有坚实理论基础的低阶多项式关系。



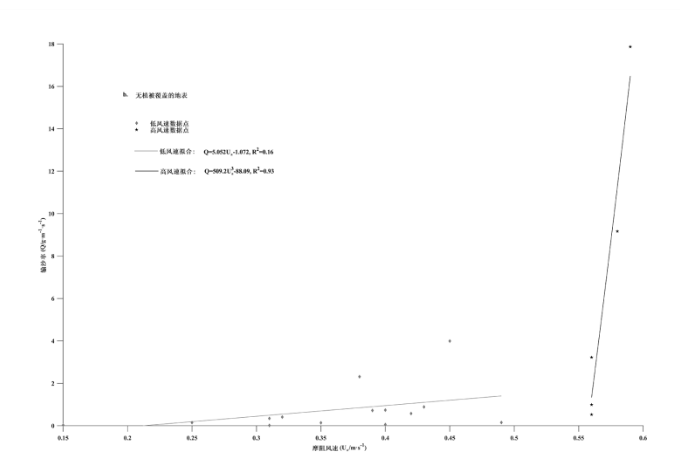


图 3 输沙率随摩阻风速的变化

Fig.3 The relationship between sediment transport rate and friction velocity

3 结论

3.1 风沙流结构

根据风沙流结构曲线的变化趋势，可以将其大致分为 3 类：波动减少、先增加后减少和单调减少。仅在植被覆盖地表上的波动减少类型中，输沙率密度与风速呈正相关关系。而在其他各条件下，两者之间无直接关系。

3.2 摩阻风速与输沙率之间的关系

在不同的地表条件下，输沙率总体上随摩阻风速的增大而增加。在植被覆盖的地表上，摩阻风速与输沙率之间不符合传统的低阶多项式关系。地表受扰后，在低风速区，摩阻风速与输沙率之间无明显相关性；在高风速区内，两者之间满足传统的低阶多项式规律，相关性较强。

致谢：感谢岑松勃、黄晓琪、赖俊华、王雪松、李庆等对野外工作的帮助。

参考文献

[1] 申元村, 王秀红, 程维明, 等. 中国戈壁综合自然区划研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(1):57-66. [Shen Yuanchun, Wang Xiuhong, Cheng Weiming, et al. Integrated physical regionalization of stony deserts in China[J]. Progress in Geography, 2016,35(1): 57-66.].

[2] 屈建军, 张克存, 张伟民, 等. 几种典型戈壁床面风沙流特性比较[J]. 中国沙漠, 2012,32(2):285-290. [Qu Jianjun, Zhang Kecun, Zhang Weimin, et al. Characteristics of sand-blown flow over simulated Gobi surfaces[J]. Journal of Desert Research,2012,32(2):285-290.].

[3] 屈建军, 黄宁, 拓万全, 等. 戈壁风沙流结构特性及其意义[J]. 地球科学进展, 2005,20(1):19-23. [Qu Jianjun, Huang Ning, Tuo Wanquan, et al. Structural characteristics of Gobi sand-drift and its significance[J].Advances in Earth Science,2005,20(1):19-23.].

[4] 邹学勇, 董光荣, 王周龙. 戈壁风沙流若干特征研究[J]. 中国沙漠, 1995,15(4):368-373. [Zou Xueyong, Dong Guangrong, Wang Zhoulong. A study on some characteristics of drifting sand flux over Gobi[J]. Journal of Desert Research, 1995,15(4):368-373.].

[5] 张伟民, 汪万福, 张克存, 等. 不同沙源供给条件下砾石床面的风沙流结构与蚀积量变化风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 2009,29(6):1015-1020. [Zhang Weimin, Wang Wanfu, Zhang Kecun, et al. Wind tunnel experiments on sand-laden wind structure and sand erosion-deposit budget over gravel bed under abundant and deficient sand supplies[J].Journal of Desert Research,2009,29(6):1015-1020.].

[6] 柳本立, 张伟民, 刘小宁, 等. 莫高窟顶戈壁偏东风作用下输沙率变化的观测研究[J]. 中国沙漠, 2010,30(3):516-521. [Liu Benli, Zhang Weimin, Liu Xiaoning, et al. Field measurements of sand transport rate change under easterly wind condition over Gobi land atop Mogao Grottoes[J]. Journal of Desert Research, 2010,30(3):516-521.].

[7] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 不同下垫面对风沙流特性影响的风洞模拟研究[J]. 干旱区地理, 2004,27(3):352-355. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Wind tunnel simulation about the effects of the different underlying surfaces on the features of drifting sand current[J].Arid Land Geography, 2004,27(3):352-355.].

[8] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究[J]. 水土保持研

究, 2005,12(1):54-58. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Research on the characteristics of structure of drifting sand flux and wind velocity profile over Gobi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005,12(1):54-58.].

[9] 张克存, 屈建军, 组瑞平, 等. 戈壁、流沙地表风沙流特性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008,22(10),55-59. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Research on the characteristics of sand-driving wind over Gobi/Mobile sand surface[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008,22(10),55-59.].

[10] 黄翠华, 王涛, 张伟民, 等. 沙质地表与砾质戈壁风沙运动对比研究——以敦煌莫高窟窟顶风沙运动为例[J]. 干旱区研究, 2007,24(4):556-562. [Huang Cuihua，Wang Tao，Zhang Weimin，et al．Contrastive study on sand drift movement over sandland and gravel Gobi desert in extremely arid regions[J].Arid Zone Reserch,2007,24(4): 556 -562.].

[11] 王志强, 黄晟敏, 于涛, 等. 戈壁地表风沙运动特征的野外观测研究[J]. 新疆环境保护, 2010,32(3):10-13. [Wang Zhiqiang, Huang Shengmin, Yu Tao, et al. Research on the characteristics of blowing sand drift over Gobi surface by field experiment[J].Environment Protection of Xinjiang, 2010,32(3):10-13.].

[12] 蒋富强, 李荧, 李凯崇, 等. 兰新铁路百里风区风沙流结构特性研究[J]. 铁道学报, 2010,32(3):105-110. [Jiang Fuqiang, Li Ying, Li Kaichong, et al. Study on structural characteristics of Gobi wind sand flow in 100km wind area along Lan-Xin Railway[J].Journal of the China Railway Society,2010,32(3):105-110.].

[13] Thomas David. Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands (third edition)[M]. Oxford: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication,2011.

[14] Wang Xunming, Cai Diwen, Sun Jimin, et al,. Contributions of modern Gobi desert to the Badain Jaran Desert and the Chinese Loess plateau[J]. Scientific Report 2019,9(1): 1-4.

[15] 孟小楠, 严平, 王振亭, 等. 车辆碾压作用下戈壁地表起尘浓度[J]. 中国沙漠, 2019:39(1):80-87.[Meng Xiaonan, Yan Ping, Wang Zhenting, et al. Dust emission by vehicle crushing: Experiments on Gobi, Gansu, China[J]. Journal of Desert Research,2019,39(1):80-87.].

[16] 殷代英, 屈建军, 组瑞平, 等. 不同扰动方式下对沙砾质戈壁地表风蚀量的影响[J]. 中国沙漠, 2014,34(1):1-8. [Yin Daiying, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Impact of disturbing modes on amount of wind erosion of sandy Gobi[J].Journal of Desert Research,2014,34(1):1-8.].

[17] Tan Lihai, Zhang Weimin, Liu Benli, et al. Simulation of wind velocity reduction effect of gravel beds in a mobile wind tunnel atop the Mogao Grottoes of Dunhuang, China[J]. Engineering Geology, 2013,159:67-75.

[18] Tan Lihai, Zhang Weimin, Qu Jianjun, et al. Aeolian sand transport over Gobi with different gravel coverages under limited sand supply: A mobile wind tunnel investigation [J]. Aeolian Research,2013,11:67-74.

[19] 王训明, 郎丽丽, 花婷, 等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系实验研究[J]. 中国沙漠, 2013,33(2):313-319. [Wang Xunming, Lang Lili, Hua Ting, et al. Gravel cover of Gobi desert and its significance for wind erosion: An experimental study[J].Journal of Desert Research, 2013,33(2):313-319.].

[20] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J]. 中国沙漠, 2019,39(5):29-36. [Yu Peidong, Chen Yinping, Li Yuqiang, et al. Influence of vegetation coverage on sand flow structure and wind erosion yield with wind tunnel experiment as a case[J]. Journal of Desert Research, 2019,39(5):29-36.].

[21] Ning Wenxiao, Huang Xiaoqi, Wang Xuesong. et al. Abrasion rates of ventifacts[J].SN Applied Sciences,2019,1(8): 855.

[22] Shao Yaping. Physics and modeling of wind erosion (secend edition) [M]. Dordrecht: Springer,2008.

[23] 王仁德，李庆，常春平，等. 新型平口式集沙仪对不同粒级颗粒的收集效率[J]. 中国沙漠，2018,38(4):1-5. [Wang Rende, Li Qing, Chang Chunping, et al. Sampling efficiency of a new flat opening collector for particles with various sizes[J].Journal of Desert Research, 2018,38(4):1-5.].

[24] 刘旭阳, 宁文晓, 王振亭. 新月形沙丘脊线处的风沙流结构[J]. 中国沙漠, 2019,39(6):76-82. [Liu Xuyang, Ning Wenxiao, Wang Zhenting, Aeolian sand structure at the brink of Barchans[J]. Journal of Desert Research, 2019,39(6):76-82.]

[25] 李宽，熊鑫，王海兵，等. 内蒙古西部高频沙尘活动空间分布及其成因[J]. 干旱区研究, 2019,36(3):657-663. [Li Kuan, Xiong Xin, Wang Haibing, et al. Spatial distribution and formation causes of frequent dust weather in West Inner Mongolia[J].Arid Zone Research,2019,36(3):657-663.]

[26] Bagnold. R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. New York: Dover Publications, INC.,1941.

[27] Tan Lihai, Zhang Weimin, Qu Jianjun, et al. Aeolian sediment transport over Gobi: Field studies atop the Mogao Grottoes, China[J]. Aeolian Research, 2016, 21: 53-60.

[28] 张春来，邹学勇，董光荣，等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2003,17(3):31-33. [Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Dong Guangrong, et al. Wind tunnel studies on influences of vegetation on soil wind erosion[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(3):31-33.].

[29] Wang Zhenting, Zhang Chunlai, Wang Hongtao, Intermittency of aeolian saltation [J]. The European Physical Journal E, 2014,37(12):126.

The sand flux characteristics near two Gobi surfaces

Liu Xu-yang[1,2*], Ning Wen-xiao[1,2], Wang Zhen-ting[1]

(*1.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049,*China*)

Abstract: The aeolian sand structure and the relationship between wind speed and sediment transport rate over the surfaces of Gobi desert with vegetation cover and artificial disturbance are analyzed, which is of great significance for protecting the ecological environment of Gobi. In the current study, the Gobi surface under vegetation cover and the Gobi desert after artificial plant removal are researched. The results show that, the variation trend of aeolian sand structure under different surface conditions is basically the same, which can be roughly divided into three categories: fluctuation decrease, decrease before increase, and monotony decrease. The sediment transport density of the disturbed surface is higher than that of the original surface. The friction wind speed is divided into high and low wind speed with the boundary of $0.50\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Meanwhile, there is no significant correlation between sand transport rate and friction wind speed in high and lower wind speed zones in vegetation covered land. However, in the surface area after artificial vegetation removal, the relationship between high speed area, sediment transport rate and friction wind speed conforms to the traditional low-order polynomial, while there is no significant correlation in the low-wind speed area.

Key words: Gobi; aeolian sand structure; sand flux transport rate; friction wind speed